

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04202

研究課題名(和文) 同軸噴射器形状が極低温高圧推進剤の混合拡散燃焼過程へ及ぼす影響の解明

研究課題名(英文) Investigation of Effects of Coaxial Injector Shape on Mixing, Diffusion, and Combustion Process of Cryogenic High-Pressure Propellant

研究代表者

坪井 伸幸 (Tsuboi, Nobuyuki)

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：40342620

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：高圧条件下での超臨界燃焼流体に対する熱力学的特性・流体力学的特性を明らかにするために、(1)単成分流体解析(2)多成分流体解析(3)実験を実施した。単成分流体解析では、ILES/RANS hybrid法を用いて同軸の極低温超臨界窒素噴流を解析し、平均内側噴流長さについて過去の実験や数値計算との比較により妥当な結果を得ることができた。多成分流体解析については、エネルギー方程式と圧力発展方程式の両方を解くハイブリッド法を開発し、圧力振動を抑制することが可能となった。実験については、冷却チャンネル内を流れる超臨界・亜臨界条件下の極低温窒素流について可視化画像や温度分布などを取得した。

研究成果の概要(英文)：The numerical and experimental studies on the cryogenic flow under the transcritical and supercritical pressures are performed in order to understand the thermodynamic characteristics and fluid dynamics. The coaxial cryogenic nitrogen jet flows under the supercritical pressure are simulated using ILES/RANS hybrid method. The mean inner jet lengths of the present simulations agree well with those of the previous experiments and numerical simulations. As for the multi-species flow simulations, the numerical method using a hybrid method between the energy equation and pressure-evolution-equation, which is able to prevent from pressure oscillations in the flow, is developed. In the experiments, visualization data and temperature profiles in the cryogenic nitrogen channel flow are measured under the subcritical and supercritical pressures.

研究分野：熱流体工学

キーワード：ロケット 航空宇宙工学 流体工学 熱工学 水素 超臨界流体

1. 研究開始当初の背景

近年のガスタービンエンジンやロケットエンジンは、高い効率や推力を得るために燃焼室内を噴射燃料・酸化剤の熱力学的臨界点を越えた超臨界状態や臨界点付近（遷臨界状態）で作動するものが増加している。熱力学的臨界点（特に酸素の臨界圧 5.04MPa）を越えると、通常の液体や気体と異なり、液体的な高密度と気体的な高拡散性を有し、また臨界点近傍では比熱・熱伝導率が急激に変化するなどの特性を示す。このような条件では、常圧下での設計手法はほとんど役立たず、全く新しい設計手法に頼らざるを得ない。たとえば液酸水ロケットエンジンについては、このような遷臨界・超臨界条件下での燃焼器中の保炎のメカニズムが明確にされておらず、ロケットエンジンの同軸型噴射器が焼損する例が数多く報告されている。また、近年のガスタービンエンジンの開発でも、高圧の化学反応の特性が変わることで保炎が難しくなるという大きな問題がみられる。

このような遷臨界・超臨界条件下での水素の燃焼現象は、液体酸素と気体水素の拡散火炎を基本とする。この拡散火炎は LOX post の厚みや post の形状に大きく依存する。そして、拡散火炎は拡散律速、すなわち拡散により支配されているが、遷臨界・超臨界状態では常圧条件下とは以下の点で大きく異なる。

(1) 熱物性（粘性、熱伝導、拡散、状態方程式）

濃度勾配による質量拡散が減少し、温度勾配による熱拡散が支配的になる（Lewis 数 >1 ）。Lewis 数 >1 では、高圧条件下の予混合火炎は脈動的不安定となることが示されている。また、遷臨界では臨界温度付近で温度変化に停滞が起きる。

(2) 流動特性（低速・高圧縮流れ、乱流）

Re 数の増大により乱流強度が増し、火炎の安定性が大きく変化する。また、拡散火炎における火炎伸長度と Lewis 数との相関が火炎の構造・安定性に寄与するが、圧力により火炎伸長度が非線形的に大きく変化する。さらに、拡散火炎の増強のためにリセスを有する噴射器が採用されるが、熱物性が常温常圧とは大きく異なるため、効果的な噴射器形状を決めることが困難である。

(3) 高圧燃焼反応（高圧特有の化学反応）

反応不活性種の HO_2 から H_2O_2 および OH ラジカルが生じ、反応しやすくなる。一方で、層流火炎速度は圧力に反比例して $1/5$ 以下まで低下する。

このように、遷臨界・超臨界状態の拡散火炎は常圧条件下に比べて上記の 3 つの点で特異なため、流動構造、火炎の構造、および保炎機構に与える影響がほとんど解明されていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究は、遷臨界・超臨界燃焼流体における熱力学的特性・流体力学的特性・燃焼過程、中でも特に熱力学的・流体力学的特性を明ら

かにするために、以下の内容について研究を行った。

(1) 単成分流体解析

超臨界・遷臨界流体における拡散混合過程とリセスの影響を、LES/RANS ハイブリッド解析により明らかにする。

(2) 多成分流体解析

超臨界・遷臨界多成分流体における拡散混合過程を、RANS 解析により明らかにする。また、燃焼流解析が可能であることを確認する。

(3) 実験

数値解析で必要となる、噴射器上流の超臨界・遷臨界条件における定量データを取得し、流路内部の流れの特性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 単成分流体解析

擬臨界温度付近の物性を精度良く再現できる SRK 状態方程式を組み込んだ 3 次元数値解析コードを使用した。乱流の取り扱いとしては、Implicit LES/RANS ハイブリッドモデルにより評価した。窒素（臨界圧 3.4MPa）を用いて 5MPa の条件、同軸噴射器の運動量流束比を 1, 2.1, 6, リセス深さを 0 と 2D (D は内径の噴射口直径) で解析を実施した。

(2) 多成分流体解析

単成分超臨界流体解析コードを 2 成分流体解析用に拡張した数値解析コードを作成した。完全保存形では超臨界流体の熱力学状態量の強い非線形性により、低温/高温流体接触面で非物理的な圧力振動が発生するため、圧縮因子の勾配をパラメータとして使用するエネルギー/圧力発展方程式ハイブリッド法を新たに導入した。一方、状態方程式は完全気体で、低速流を解析可能とするために多化学種流体対応の前処理法が導入された 3 次元燃焼流体解析コードを用いて、酸水素剪断流における着火・火炎伝播の解析を実施した。

(3) 実験

超臨界槽、極低温窒素供給配管、高圧可視化容器、冷却チャンネルで構成される実験装置を使用した。極低温窒素は超臨界圧以上に加圧した。冷却チャンネル中を極低温窒素が流れる際、非定常可視化を用いた PIV 流速分布測定、レーク温度計による流路内温度分布測定、固体壁温度分布、および壁面熱流束分布を計測した。

4. 研究成果

(1) 単成分流体解析

図 1 に瞬間密度分布の圧力による比較を示す。ここで密度は $\rho^* = (\rho - \rho_{inj}) / (\rho_{in} - \rho_{inj})$ で無次元化している。密度分布より、低温高密度の内側噴流の構造が把握できる。また、内側噴射口ポスト背後から発生した渦構造により噴流の表面が巻き上げられ、また渦構造による周囲流体の巻き込みと渦の崩壊により混合が進む結果が得られた。

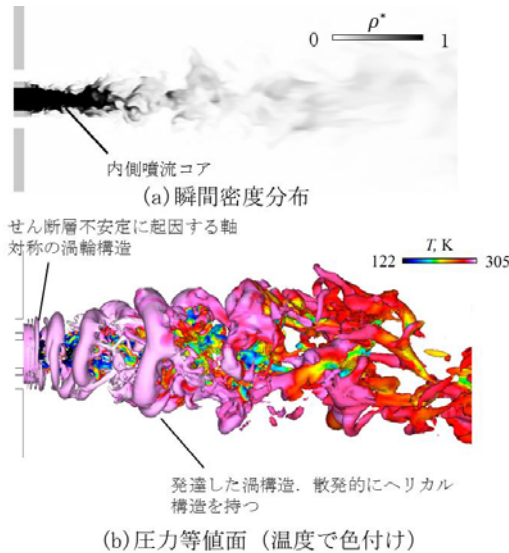


図1. 5MPa, 運動量流束比2 (Rn0J2)の瞬間分布

同軸噴流における混合を評価する指標として、平均内側噴流の長さ、すなわち中心軸上における高密度領域の軸方向の長さが広く使われる。この平均内側噴流長さについて、超臨界圧力下の同軸噴流における、過去の実験的研究、数值的 (LES) 研究の結果との比較を図2に示す。平均内側噴流長さは、本研

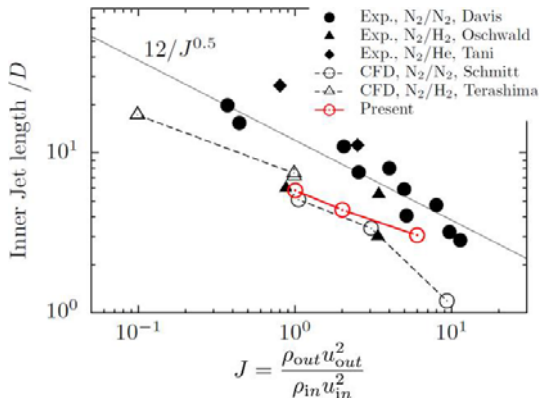


図2. 運動量流束比に対する平均内側噴流長さの比較

究では内側噴流の平均密度が 50%に減衰した位置 (つまり $\rho^* = 0.5$ となる中心軸上位置) と定義した。本結果ではこれまでの研究と同じように、運動量流束比に対して噴流長さが対数的に減少する傾向が得られている。また、異種流体の同軸噴流 (Oswald らと Terashima) と、同種流体の同軸噴流 (Schmitt らと本研究) との間で、勾配に大きな差異は見られない。つまり、同軸噴流の混合は、速度比などで特徴づけられる流体力学的な不安定性や乱流が支配的であり、異種流体による拡散の影響は小さいことが分かる。また、混合に対する噴射条件の影響の評価に関しては、窒素/窒素の同種の同軸噴流により、実際の酸素/水素のような重い流体と軽い流体の異種の同軸噴流についても予測するこ

とが可能であることも示唆している。

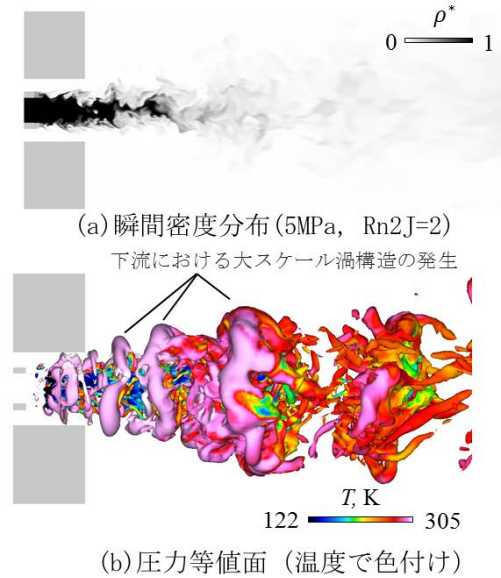


図3. 5MPa, 運動量流束比2, リセス長さ2D (Rn2J2)の瞬間分布

図3にリセス長さが2Dの場合の瞬間分布の結果を示す。図1と比較すると、噴射口下流では大スケール渦構造が発生していることが分かる。このことから、有限長さのリセスを設けることで、同軸噴流の混合を促進する効果が強まることが言える。

(2) 多成分流体解析

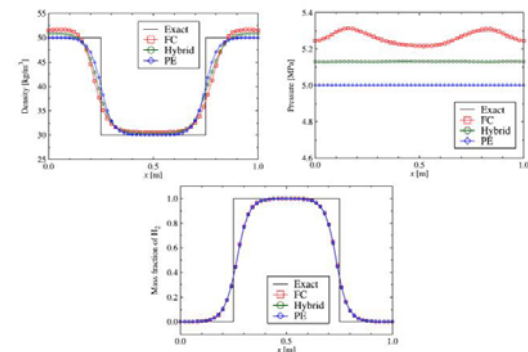


図4. 5MPa, 移流速度50 m/sの移流問題. FC:完全保存方程式; PE:圧力発展方程式, Hybrid: ハイブリッド法

超臨界圧力下における窒素/水素接触面の移流問題に対して、エネルギー方程式を含む完全保存形を解く方法 (FC)、エネルギー方程式の代わりに圧力発展方程式を解く方法 (PE) およびハイブリッド法 (Hybrid) による解析を行い安定性について検討した。計算条件は、窒素および水素の超臨界圧力を超える 5.0 MPa, 移流速度を 50.0 m/s とした。

図4に時刻 0.02 s における密度、圧力および水素の質量分率の分布を示す。水素の質量分率の分布はどの計算法についても大きな違いは見られないが、完全保存形では圧力

振動が発生している。圧力発展方程式では 2 流体間の接触面における圧力振動は発生していない。また、2 流体間の接触面を伴う移流問題に関しても、ハイブリッド法により圧力振動の抑制が可能である。

次に常温で圧力が 0.01 MPa の条件下で、前処理法を考慮した水素/空気剪断流れの解析を行った。格子解像度の影響による評価が必要であるものの、剪断流れの流速により火炎領域が流される場合(図 5)と上流に遡る場合の結果を示した。

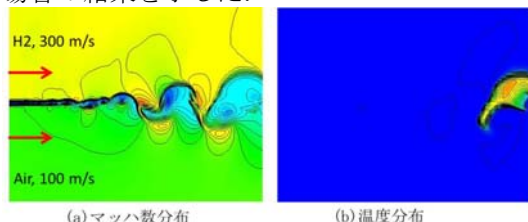


図5. 剪断流れにおける火炎伝播の瞬間図

(3) 実験

実験に用いた装置の概要図を図 6 に示す。また、冷却チャンネル内の窒素流の亜臨界圧(2 MPa)と超臨界圧(4 MPa)の可視化結果の比較を図 7 に示す。流体は上から下へ流れている状態であり、実験開始から約 30 秒後の可視化画像である。亜臨界圧では流れ場全体が黒い影になっていることから液相状態であるが、流路中心では白い領域が見られ、気泡が観測される。一方、超臨界圧では流路中には輝度のゆらぎは見られるものの、気泡やキャビテーションなどの現象は見られず、単相流体として仮定できると判断できた。

また、得られた計測データから、遷臨界条件で温度境界層が有意に薄くなることや、流路内の流れ場に強い不連続がないことも把握できた。

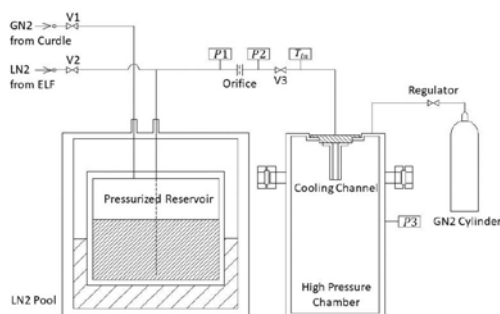


図6. 極低温高圧実験装置の概要図

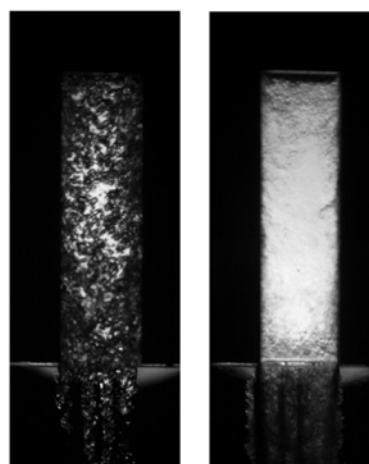


図7. 極低温高圧実験装置の概要図

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

① H. Nagashima, S. Tsuda, N. Tsuboi, A. K. Hayashi, T. Tokumasu, A Molecular Dynamics Study of Nuclear Quantum Effect on Diffusivity of Hydrogen Molecule, Journal of Chemical Physics, Vol. 147, 24501, 2017. 査読有

<http://dx.doi.org/10.1063/1.4991732>

② 都木貴彦, 寺本進, 岡本光司, “超臨界圧条件下におけるチャンネル乱流の乱流熱伝達の直接数値計算”, 日本航空宇宙学会論文集, 日本航空宇宙学会, Vol. 64, No. 4, pp. 215-222, 2016. 査読有

③ H. Tani, S. Teramoto, T. Toki, S. Yoshida, K. Yamaguchi and K. Okamoto, “Temperature measurement of cryogenic nitrogen jets at supercritical pressure”, EUCASS Book Series Advances in Aerospace Sciences Progress in Propulsion Physics, The European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS), Vol. 8, pp. 43-54, 2016. 査読有

④ D. Muto, H. Terashima, N. Tsuboi, Characteristics of Jet-Mixing at Supercritical Pressure: Effects of Recess Length and Post Height, TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN, Vol. 14 (2016), Pa_45-Pa_52, No. ists30, 2016. 査読有

⑤ S. Tsuda, M. Tomi, N. Tsuboi, S. Ikawa, T. Tokumasu, Extraction of the Density Fluctuations in Diatomic Fluids Around the Critical Points Using Molecular Dynamics

Simulation, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol.15, No.4, pp. 3117-3120, 2015. 査読有
<http://dx.doi.org/10.1166/jnn.2015.9623>

[学会発表] (計13件)

①R. Takahashi, N. Tsuboi, T. Tokumasu, S. Tsuda, Validation of applicability of classical mixing rule in a van der Waals type equation of state for oxygen-hydrogen mixture system, The 13th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, 2017.

②荒木天秀, 武藤大貴, 寺島洋史, 坪井伸幸, 圧力発展方程式を用いた超臨界・多成分噴流に関する数値解析, 第31回数値流体力学シンポジウム, 2017.

③S. Kozuka, D. Muto, H. Terashima, N. Tsuboi, Numerical Study of Cryogenic Hydrogen Jet in Crossflow under Supercritical Pressures, Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, 2017.

④T. Toki, S. Teramoto, K. Okamoto, Direct Numerical Simulation of Heated Cryogenic Channel Flow at Supercritical Pressure, 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2017.

⑤ T. Toki, S. Teramoto, K. Okamoto, Numerical Simulation of Heat Transfer Flow-Field under Transcritical Condition, 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2017.

⑥ T. ARAKI, D. MUTO, H. TERASHIMA, N. TSUBOI, Numerical Simulation for Effects of Pressure on Cryogenic Coaxial Jet under Supercritical Pressure, 2017 AIAA Science and Technology Forum and Exposition, 2017.

⑦都木 貴彦, 寺本 進, 岡本 光司, 伝熱劣化が生じる超臨界乱流伝熱場の数値解析, 第60回宇宙科学技術連合講演会, 2016.

⑧荒木天秀, 武藤大貴, 寺島洋史, 坪井伸幸, 超臨界圧下における同軸噴流への圧力の影響に関する数値解析, 第48回流体力学講演会/第34回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2016.

⑨D. Muto, N. Tsuboi, H. Terashima, Mixing Characteristics of a Recessed Coaxial Jet at Supercritical Pressure, AIAA SciTech2016, 2016.

⑩ T. TOKI, S. TERAMOTO, S. KAWAI, K. OKAMOTO, Numerical Study of Heat Transfer Characteristics in Supercritical Channel Flow, 30th International Symposium on Space Technology and Science, 2015.

⑪ D. Muto, N. Tsuboi, H. Terashima, Effects of the Recess Length on Supercritical Jet Mixing of Co-planar/Axial Injectors, 6th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS), 2015.

⑫ D. Muto, N. Tsuboi, H. Terashima, Characteristics of Jet-Mixing at Supercritical Pressure for Coaxial Rocket Injector Design, 30th International Symposium on Space Technology and Science, 2015.

⑬武藤大貴, 寺島洋史, 坪井伸幸, 超臨界圧力下における極低温同軸噴流の3次元数値解析, 第29回数値流体力学シンポジウム, 2015.

[その他]

九州工業大学大学院工学研究院機械知能工学研究系 反応流体力学研究室ホームページ
<http://www.mech.kyutech.ac.jp/rfd/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坪井 伸幸 (TSUBOI Nobuyuki)
九州工業大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 40342620

(2) 研究分担者

寺本 進 (TERAMOTO Susum)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 30300700

(3) 連携研究者

越 光男 (KOSHI Mitsuo)
横浜国立大学・環境情報研究院・客員教授
研究者番号: 20133085

林 光一 (HAYASHI A. Koichi)
青山学院大学・理工学部・名誉教授
研究者番号: 60156437

徳増 崇 (TOKUMASU Takashi)
東北大学・流体科学研究所・教授
研究者番号: 10312662

津田 伸一 (TSUDA Shinichi)
九州大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 00466244

寺島 (石原) 洋史 (TERASHIMA (ISHIHARA)
Hiroshi)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：20415235

清水 太郎 (SHIMIZU Taro)
国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・
研究開発部門・研究員
研究者番号：00446600

朝原 誠 (ASAHARA Makoto)
岐阜大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：40633045

森井 雄飛 (MORII Youhi)
早稲田大学・次世代自動車研究機構・
次席研究員 (専任講師クラス)
研究者番号：50707198

永島 浩樹 (NAGASHIMA Hiroki)
琉球大学・工学部・助教
研究者番号：00759144

武藤 大貴 (MUTO Daiki)
国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・
研究開発部門・宇宙航空プロジェクト・
研究員
研究者番号：80795815

小澤 晃平 (OZAWA Kohei)
九州工業大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：90801879